

# 3차원 곤충 날갯짓 비행의 날개-몸통-와류 상호작용이 비정상 공력특성에 미치는 영향에 대한 수치적 연구

Numerical Analysis on the Unsteady Aerodynamic Characteristics of Wing-Body-Vortex  
Interactions in Three-dimensional Insects' Flapping Flight

이근배<sup>1\*</sup>, 김종암<sup>2</sup>

서울대학교 협동과정 계산과학전공<sup>1</sup>, 서울대학교 기계항공공학부<sup>2</sup>

## 초 록

본 논문에서는 검정금파리의 진진비행 시 나타나는 3차원 날개-와류-몸통 상호작용이 비정상 공력 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 검정금파리의 날갯짓 비행은 낮은 레이놀즈수의 유동 영역에 해당되므로, 3차원 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 적용하였다. 본 연구에서는 3차원 날개-몸통 전체 해석을 수행하였으며, 복잡한 날개-와류-몸통 상호 작용으로 나타나는 비정상 공력 특성을 분석하기 위해 다양한 몸통 받음각 하에서 5가지 형상의 날개에 대한 수치해석을 수행하였고, 그 결과를 날개만 해석한 경우와 비교하였다. 또한, 실제 날개 형상 및 몸통 받음각이 곤충의 날갯짓 비행의 공력 발생에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

## ABSTRACT

This paper investigates the unsteady aerodynamic features of wing-body-vortex interactions in three-dimensional insects' flapping motions under forward flight conditions. Since the flow field around the blowfly exhibits characteristics of low-Reynolds number flow, three-dimensional unsteady incompressible Navier-Stokes equations are employed as the governing equations. Detailed numerical simulations of five types of wings are carried out under various body angles to examine unsteady flow characteristics resulting from the complicated wing-body-vortex interactions, and the results are compared with those of the wing only case. Also, it is revealed that realistic geometric considerations have a considerable influence on the aerodynamic force generation in insects' flight.

Key Words : Insect Flight (곤충비행), Three-dimensional Unsteady Flow (3차원 비정상유동), Wing-Body-Vortex Interactions (날개-몸통-와류 상호작용)

## 1. 서 론

최근 세계 각국에서는 곤충이나 새와 같이 비행 가능한 생물체의 산업적, 경제적, 과학적 측면에서 관심이 고조되면서 이들을 하나의 자원으로 인식하고 활용하려는 경쟁이 치열해지고 있다. 그 중에서 상대적으로 작고 가벼우며 급격한 기동이 가능한 곤충의 가치를 재평가하고 이용하려는 연구가 활발히 진행 중에 있다. 특히 항공우주분야에서는 곤충의 비행 메커니즘 밝혀내고, 이를 실제 초소형 비행체에 적용하고자 하는 노

력을 기울여왔다. 곤충의 날갯짓 비행은 상대적으로 느린 속도에서도 충분한 양력과 추진력을 낼 수 있다는 장점 때문에 선행 연구자들에 의해 실험적, 수치적인 방법으로 다양한 연구가 진행되어 왔다.<sup>(1~4)</sup>

선행 연구들이 곤충의 날갯짓 비행에서 발생하는 여러 가지 흥미로운 유동 현상에 대해 과거에는 알지 못했던 많은 사실들을 알려주지만, 3차원 진진 비행에서 발생하는 날개-와류-몸통 상호 작용과 같은 복잡한 비정상 유동 특성에 대해서는 아직까지 충분한 연구가 진행되지 않았다. 또한, 막대한 계산 시간 때문에 선행연구의 대부분

이 상대적으로 적은 개수의 격자를 이용하여 전반적인 물리 현상에 대해 연구를 수행해 왔기 때문에, 날개 주위에서 발생하는 유동 특성을 정밀하게 분석하는데 한계가 있었다.

본 연구에서는 곤충 비행에서 발생하는 유동 현상을 정밀하게 분석하기 위하여 고정밀 3차원 날개-몸통 전체 해석을 수행하고자 한다. 3차원 와류의 복잡한 구조와 날개-와류, 와류-와류, 날개-몸통의 상호작용을 분석하고, 몸통의 받음각 및 날개의 형상에 따라 공력 발생에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

## 2. 해석 기법

### 2.1 지배방정식

지배 방정식은 3차원 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식으로, 날개운동을 모사하기 위해 동적격자 기법을 도입하였다. 비압축성 효과를 고려하기 위해 Pseudo compressibility 기법을 적용하였으며, 공간 차분은 Osher's upwind scheme과 MUSCL을, 시간 적분은 LU-SGS 기법을 사용하였으며, 비정상 계산을 위하여 이중시간진법(Dual time stepping)을 사용하였다.

본 연구에서 사용된 3차원 해석코드는 김진호 등<sup>(4)</sup>에 의해 과실 파리의 3차원 날개 운동의 실험 및 수치해석 결과와 비교하여 검증되었다. 검정금파리 전진비행의 레이놀즈수 크기가  $10^2 \sim 10^3$  정도이므로, 전 유동장을 층류로 가정하였다.

### 2.2 날개 운동 모델링 및 격자계 구성

검정금파리의 3차원 날개 운동은 Nachtigall<sup>(5)</sup>이 전진 비행 모사 실험을 통해 얻은 날개 운동 궤적을 이용하였다. Nachtigall은 실험을 통해 XY, YZ, ZX 평면에서의 날개의 움직임을 초고속 카메라를 이용하여 촬영하였다. 본 연구에서는 실험을 통해 측정된 날개의 움직임 각을 Fourier 급수로 변환하여 해석 코드에 적용하였다.

검정금파리의 날개 및 몸통형상은, 참고문헌<sup>(5)</sup>을 통해 얻었으며, Fig. 1과 같이 5가지 형태의 날개를 모델링 하였다. 또한, 검정금파리 몸통 받음각이 공력 발생에 미치는 영향을 분석하기 위하여 몸통 받음각을 0~60도로 변화시켜가며 해석을 수행하였다.

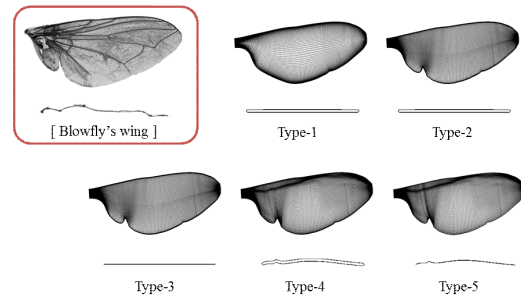


Fig. 1 Geometric modeling of a blowfly's wing planform and sectional shape

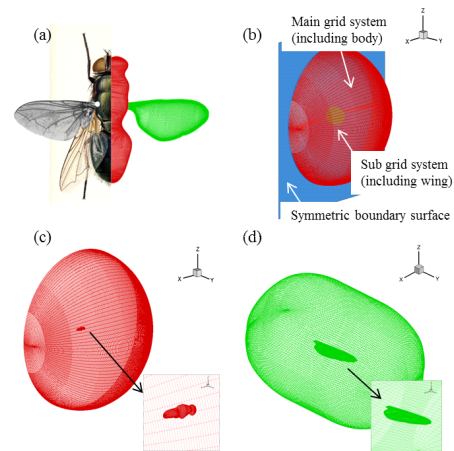


Fig. 2 Geometric modeling of a blowfly's full-body

Fig. 2는 두 개의 격자시스템으로 이루어진 중첩 격자 시스템을 나타내며, 선행연구에서의 해석경험<sup>(4)</sup>을 바탕으로 몸통을 포함하는 주격자계 (약 310만)와 날개를 포함하는 부격자계 (약 250만)를 구성하였다. 벽면에서 첫 번째 격자점 간격이  $5 \times 10^{-3}$ 인 격자를 사용하였으며, 원방경계의 경우 몸통 길이의 10배, 날개 평균시위의 30배 (날개 길이방향의 12배)로 구성하였다. 유동 패턴의 주기성이 나타나도록 6주기 동안 반복계산을 수행하였다.

## 3. 해석 결과

일반적으로 곤충의 전진 비행에서 몸통 받음각은 약 30~60도 사이인 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 몸통 받음각이 공력 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 0~60도까지 변화시켜가

며 3차원 날개-몸통 전체 해석을 수행하였다. Fig. 3은 몸통 받음각에 따른 날개-몸통 전체를 해석한 경우와 날개만 해석한 경우의 두 주기 동안 양력 및 추력 계수 그래프를 나타낸다.

그림에서 나타내는 바와 같이, 날개-몸통 전체를 해석한 경우에도 양력은 주로 하향날갯짓에서 추력은 주로 상향날갯짓에서 발생함을 확인할 수 있다. 이는 3차원 날개 해석 결과<sup>(4)</sup>와 비슷한 결과로 전반적인 유동 패턴은 상당히 유사하다고 할 수 있다. 3차원 날개-몸통 해석 결과에서 나타나는 대표적인 차이점은, 하향날갯짓 중반에서 양력곡선이 날개 해석 결과보다 급격한 곡선을 그린다는 점이다. 이는 날개에서 박리된 와류가 몸통과 상호작용하여 간섭을 받기 때문이다. 이러한 현상은 날개 위 또는 아랫면에서의 압력 분포에 영향을 미치게 되며, 그 결과 공력 특성이 달라지는 것이다. 반대로 몸통에서 박리된 와류 역시 날개에서 발생하는 와류에 의해 상호 간섭을 받게 되어 공력 특성에 영향을 미치게 된다.

### 3.1 날개-몸통-와류 상호작용

Fig. 4는 하향날갯짓 중반에서 3차원 와류 구조 및 표면 압력 분포를 나타낸다. 몸통의 존재 때문에 이전 주기의 상향날갯짓으로 인해 발생한 와류 (Fig. 4에서 파란 점선)가 현 주기의 하향날갯짓 동안에도 지속적으로 유지되어 와류 구조를 복잡하게 만드는 것을 알 수 있다. 유지된 와류는 현 주기의 하향날갯짓 때 날개에서 떨어져 나

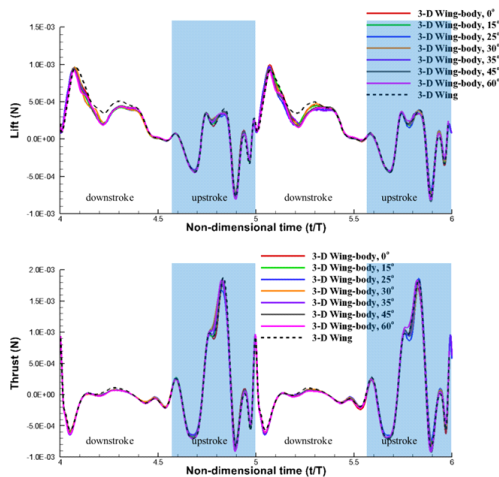


Fig. 3 Time histories of instantaneous lift(up) and thrust(down) coefficient in 3-D wing-body simulation at various body AOA

간 와류와 상호작용하여 후류로 빠져나가려는 와류의 흐름을 방해한다. 그 결과 날개 뒷전에서 와류가 박리되는 속도가 상대적으로 감소하게 되어 그 부근에서 높은 압력 분포가 나타나는데, 이는 Fig. 4의 날개 표면 압력 분포를 통해 확인할 수 있다. 날개 루트 근처에서 윗면과 아랫면의 높은 압력 분포는 날개-몸통 해석에서 더 크고 넓게 나타나며 결과적으로 양력을 감소시키는 효과를 발생시킨다.

결론적으로 몸통 받음각에 따라 날개 윗면과 아랫면의 압력 분포가 달라지지만 Fig. 3에서와 같이 전체적인 힘의 크기는 정성적으로 유사하게 나타남을 볼 수 있다. 이는 기동성과 순간적인 조정성이 뛰어난 검정금파리의 비행 특성이 급격한 받음각의 변화에도 지속적으로 유지됨을 시사한다.

날개 및 날개-몸통 전체에서 발생하는 공력 값들의 시간 평균값을 비교해보면, 날개만 해석한 경우 양력이 가장 높게 나타났으며, 추력의 경우 받음각 30도일 때 가장 높게 나타났다. 이러한 결과를 통해서 검정금파리의 전진 비행에서 날개-몸통 상호작용이 분명히 존재함을 확인할 수 있으며, 몸통 받음각이 30도일 때 양력과 추력 발생에 가장 유리한 것을 확인할 수 있었다.

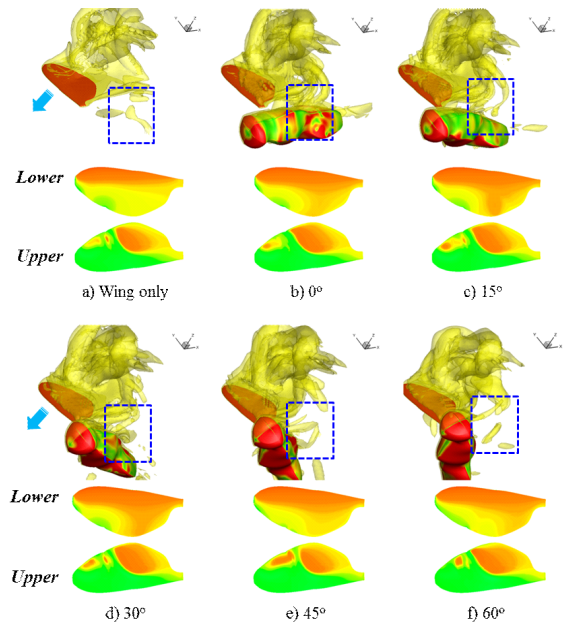


Fig. 4 Vorticity (up) and surface pressure (down) at the middle of downstroke

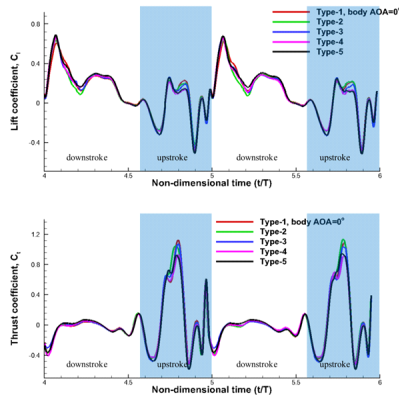


Fig. 5 Time histories of instantaneous lift(up) and thrust(down) coefficient in 3-D wing-body simulation of four types of wing

### 3.2 날개 형상에 따른 공력특성

Fig. 5는 몸통 받음각이 0도일 때 5가지 타입의 날개에서 발생하는 양력 및 추력계수 그래프를 나타낸다. 그림을 통해 상향 날갯짓 중반에서 type-4, 5의 양력과 추력이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 날개의 진행 방향으로 발생하는 음의 캠버 효과로 설명할 수 있다.

Fig. 6는 5가지 타입의 날개 단면에서 발생하는 압력장을 나타내며, type-1 ~ 3에서는 날개 앞전에서 발생하는 강한 앞전와류의 영향으로 저압영역이 뒷전까지 전파되는 것을 확인할 수 있다. 반면, type-4와 5에서는 음의 캠버 효과로 인한 유효 받음각의 감소로 앞전와류의 강도가 줄어들어 뒷전부근에서 압력이 회복되는 것을 확인할 수 있다. Type-1 ~ 3와 type-4 ~ 5 날개의 윗면과 아랫면의 압력차의 차이로 인해 Fig. 5에서와 같이 양력 및 추력 발생에 차이가 나타나게 되는 것이다.

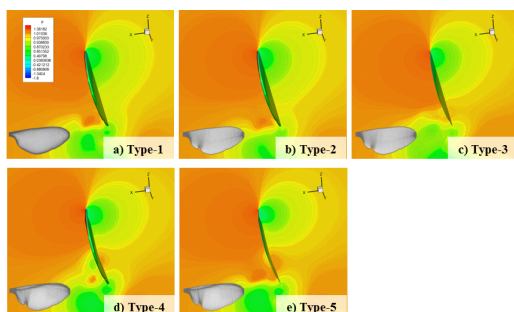


Fig. 6 Cross-sectional pressure of the 4 types at the middle of upstroke

## 4. 결 론

본 논문에서는 검정금파리 전진 모사 비행의 수치해석을 통해, 3차원 날개-와류-몸통 상호작용으로 나타나는 비정상 공력 특성을 분석하였다. 날개-몸통 해석 결과는 날개만 해석한 결과와 정성적으로 유사하나 정량적으로는 큰 차이를 나타내며, 이를 통해 곤충의 날갯짓 비행에서 날개-몸통 상호작용 역시 중요한 유동 특성임을 확인할 수 있었다. 또한, 몸통 받음각 및 날개 형상과 같은 기하학적 요소에 대한 파라메트릭 연구를 통해서 공력 발생에 가장 유리한 몸통 받음각과 날개 형상이 존재함을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과를 통해 관찰된 날개-와류-몸통 간의 상호작용과 이로 인해 발생하는 공력 특성은 검정금파리의 급격한 기동성과 조종성을 설명할 수 있는 중요한 단서가 될 것으로 판단된다.

## 후 기

본 논문은 교육과학기술부 첨단사이언스 교육허브개발사업(EDISON)의 지원(2011-0020559)과, 국토해양부 건설기술혁신사업 초장대교량사업단(08기술혁신E01)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Ellington, C. P., 1999, "The novel aerodynamics of insect flight: applications to micro-air-vehicles," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 202, pp. 3439-3448.
- (2) Dickinson, M. H. and Gotz, K. G., 1993, "Unsteady Aerodynamic Performance of Model Wings at Low Reynolds Numbers," *Journal of experimental biology*, Vol. 174, No. 1, pp. 45-64.
- (3) Lee, J., Kim, J., and Kim, C., 2008, "Numerical Study on the Unsteady-Force-Generation Mechanism of Insect Flapping Motion," *AIAA journal* Vol. 46, No. 7, pp. 1835-1848.
- (4) Kim, J. H., and Kim, C., 2011, "Computational Investigation of Three-dimensional Unsteady Flowfield Characteristics around Insects' Flapping Flight," *AIAA journal* Vol. 49, No. 5, pp. 953-968.
- (5) Nachtigall, W., 1974, *Insects in flight*, McGraw-Hill.